

УДК 550.83

Е. Д. КУЗЬМЕНКО<sup>1</sup>, В. Ю. МАКСИМЧУК<sup>2</sup>, С. М. БАГРІЙ<sup>1</sup>, О. Я. САПУЖАК<sup>2</sup>,  
І. В. ЧЕПУРНИЙ<sup>1</sup>, С. А. ДЕЩИЦЯ<sup>2</sup>, У. О. ДЗЬОБА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76000, тел. (0342) 72-47-16, факс (0342) 54-67-25, e-mail: gbg@nung.edu.ua

<sup>2</sup>Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, вул. Наукова, 3-б, м. Львів, 79060, тел. +38(032)2648563, ел. пошта carp@cb-igph.lviv.ua

<https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.054>

## КОМПЛЕКСУВАННЯ МЕТОДІВ ЕЛЕКТРОРОЗВІДКИ У ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНОГЕННИХ ПРОСІДАНЬ І ПРОВАЛІВ НА РОДОВИЩАХ СОЛІ ПЕРЕДКАРПАТТЯ

**Мета.** Метою роботи є дослідження ефективності комплексу методів природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) та зондувань становленням електромагнітного поля (ЗС) для попередньої оцінки ступеня стабільності гірничих масивів у межах родовищ калійних солей Передкарпаття, а також прогнозування розвитку деформаційних процесів у приповерховому шарі геологічного середовища. **Методика.** Проведення площинних та профільних спостережень методами ПЕМПЗ та ЗС на території шахтних полів родовищ калійних солей та побудова моделей геоелектричних розрізів, визначення зон із аномальними значеннями електричної провідності та інтенсивності природного електромагнітного випромінювання. **Результати.** За результатами профільних електрометричних методів (ЗС) та площинних спостережень ПЕМПЗ на території шахтного поля рудника № 2 Стебницького родовища калійних солей виявлено та оконтурено зони аномальних значень електропровідності та аномалії інтенсивності електромагнітного випромінювання. На основі комплексної інтерпретації виділено зони підвищеної карстопровальної небезпеки на ділянці автодороги Трускавець – Пісочне. Зроблено висновок про високу інформативність та ефективність комплексу методів ЗС і ПЕМПЗ для оцінювання ступеня карстопровальних процесів у зонах розроблення корисних копалин. **Наукова новизна.** Полягає в експериментально підтвердженій ефективності та високій інформативності комплексного застосування методів ЗС і ПЕМПЗ для вивчення стану геологічного середовища, охопленого карстопровальними процесами у межах родовищ калійних солей. **Практична значущість.** Запропонований комплекс геофізичних методів ЗС і ПЕМПЗ дає змогу із високою достовірністю спрогнозувати зони ймовірних карстових провалів, що дасть можливість здійснити запобіжні заходи для мінімізації наслідків розвитку геологічних карстопровальних ситуацій.

*Ключові слова:* Стебницьке родовище; калійна сіль; суфозійно-фільтраційний процес; електророзвідка; гіпсо-глиниста шапка; карст; депресія.

### Вступ

Проектування розробки родовищ калійної солі у Передкарпатті (Калуш-Голинське та Стебницьке) здійснювалось в 50–60-ті роки минулого століття. Вважалось, що шахтний спосіб видобутку за умов належного дотримання проектних рішень забезпечить стійкість гірничих масивів. Відповідно на той час і мови не могло бути про будь-які просідання земної поверхні та провали на ній. Дійсність спростувала ці твердження.

У межах Калуш-Голинського родовища розроблялись такі шахтні поля: Північне каїнітове, Центральне каїнітове, Хотинське сільвінітове, Східна Голинь, Сівка Калуська. На всіх названих шахтних полях, без винятку, спостерігались просідання та карстові провали. Найбільше просідання зафіксовано на Північному каїнітовому полі – 4,8 м, де утворилось озеро. Площа найбільшої провальної лійки становила близько 0,6 га. На Стебницькому родовищі поклади солі не розділялись на окремі шахтні поля і відпра-

цьовувались двома рудниками № 1 та № 2. Максимальні просідання на руднику № 1 досягали понад 1,5 м у районі озера Болоня, а на руднику № 2 – 1,76 м. На Калуш-Голинському родовищі зафіксовано 25 карстопровальних воронок, а на Стебницькому родовищі – 29.

Особливе занепокоєння останнім часом викликає територія Стебницького гірничого відведення, де у вересні 2017 р. відбувся найвідчутніший в історії експлуатації соляних родовищ Передкарпаття карстовий провал. Провальна воронка досягала 220–230 м у діаметрі та глибину 45–47 м. Вийшла з ладу ЛЕП 220, опори якої опинились у воронці, та водогін, що постачав воду до міста Дрогобич. У 2016–2017 рр. активізувалась деформація поверхні у районі автодороги Пісочне–Східниця – основної автомагістралі у напрямку курорту державного значення Трускавець. Від автодороги до карстового провалу близько 300 м, а соляний пласт та видобувні камери пролягають під автодорогою.

Проблема полягає у необхідності розроблення методології просторово-часового прогнозування карстопровальних явищ та напрацювання комплексу методів, які могли б забезпечити зазначене прогнозування.

Передкарпатські соляні родовища не є винятком щодо розвитку природно-техногенного карсту. На значній кількості родовищ світу відзначалась невідповідність геологічних та гідрогеологічних моделей, покладених в основу проєктних рішень, реальній ситуації. Огляд аварій на рудниках солі в Росії, Німеччині, Україні наведено у монографії [Гайдін, Рудько, 2016]. Щодо соляних родовищ України, то окремі розрахункові схеми стійкості гірничих масивів із прогнозом аварій наведено насамперед у звітах із науково-дослідних робіт фахівців ТзОВ “Інститут “Гірхімпром” (Львів). Результативну частину цих звітів відображено в опублікованих працях [Гайдін, та ін., 2014; Гайдін, Рудько, 2016; Гайдін, 2018; Дяків, та ін., 2018]. До цих робіт треба теж зарахувати необхідні дослідження щодо гідрогеологічних умов та деформації земної поверхні [Гайдін, та ін., 2014; Павлюк, 2016; Мордвінов, та ін., 2018; Бурак, та ін., 2014].

Зазначені дослідження ґрунтувались на численних геологічних матеріалах, даних буріння, результатах режимних гідрогеологічних досліджень, фактах прориву підземних вод у гірничі виробки, безпосередніх спостереженнях за станом підземних виробок.

Окремо слід виділити геофізичні дослідження, які надають можливість встановити диференціацію порід гірничих масивів за такими параметрами, як швидкість пружних хвиль, густина та електричний опір гірських порід. Загальний огляд цих досліджень наведено у монографії [Огильви, 1990]. Геофізичні методи дають змогу виокремити та вирішити окремі завдання, пов’язані із констатацією стану гірничого масиву на певних стадіях його деградації, та, в окремих випадках, надати прогностичні рішення. Проте залишаються невирішеними проблеми комплексного підходу та визначення достатнього ефективного комплексу універсальних геофізичних методів неруйнівного контролю стану та розвитку геологічних процесів.

Досвід геофізичних досліджень на соляних родовищах в Україні свідчить, що для вивчення соляного карсту доцільного обмежитись трьома методами: гравіметрією, зондуванням становленням електромагнітного поля (ЗС), методом природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) [Багрій, 2016; Kuzmenko, та ін., 2017; Kuzmenko, та ін., 2018; Шуровський та ін., 2012, 2013; Дешиця та ін., 2016; Максимчук та ін., 2019].

Площинна гравіметрія вирішує завдання об’ємної диференціації порід гірського масиву за густиною. Зони пониженої густини узгоджуються із зонами вилуговування солі та підвищеної фільтрації. Отже, їх виявлення та картування дає змогу за дефіцитом щільності порід встановити

зниження стійкості гірничого масиву та можливість просідань і провалів. Досвід показує, що всі карстові лійки на поверхні узгоджуються із приповерхневим розущільненням гірських порід, яке розвивається на глибину, тобто ці лійки є звичайно місцем інтенсивного поглинання підземних вод та подальшої активної їх фільтрації. Основний недолік методу гравіметрії – це необхідність забезпечити кількісну інтерпретацію геологічними моделями початкового наближення, основою для яких є серія геологічних розрізів. Сітка вузлів моделі повинна бути співвимірною із похибкою геометризації кінцевих геогустинних зрізів та розрізів. Це можливо тільки на територіях експлуатації, але за їх межами, внаслідок фрагментарності геологічного матеріалу, інтерпретація ускладнюється. Тому як на Стебницькому, так і на Калуському родовищах гравіметрію виконували по окремих ділянках, пов’язаних із карстовими провалами [Шуровські, та ін., 2012, 2013].

Метод зондування становленням електричного поля дає змогу побудувати геоелектричні розрізи та зрізи, тобто встановлювати диференціацію гірських порід за електричним опором з глибиною та по латералі. При цьому повинні виділятися зони розущільнення, насичені водним розчином, за зміною опору залежно від мінералізації. Отже, вирішується завдання відслідковування зон активної фільтрації підземних вод та зон підвищеної пустотності у гірничому масиві. Це дає підстави робити прогностичні висновки щодо можливих просідань і провалів. Порівняно з гравіметрією, перевага методу в тому, що він не потребує для інтерпретації детальних початкових моделей, і використовується будь-яка апріорна інформація. Недоліком методу є узагальнений характер інформації, тобто отриманий розподіл зміни електричного опору з глибиною “приписується” не одній точці, а площі, яка визначається розміром установки. Створення достатньо щільної сітки спостережень (як зазвичай роблять у гравіметрії) ускладнюється внаслідок високої вартості робіт і технічних обмежень виконання зондувань на урбанізованих ділянках. На соляних родовища Передкарпаття спостереження методом ЗС переважно виконують за окремими профілями [Дешиця та ін., 2016].

Метод ПЕМПЗ ґрунтується на відображенні в полі природного електромагнітного випромінювання напружено-деформованого стану гірських порід. Стилий виклад теоретичних відомостей щодо методу наведено у праці [Kuzmenko, та ін., 2018]. Завдяки тому, що сигнал реєструється в одній точці переносним приладом, з’являється можливість застосування щільної мережі спостережень. Тому отримані аномалії інтенсивності поля доволі детально відображають проєкцію зони розвитку деформації у гірничому масиві на земну поверхню. Проте неоднозначності у встановленні глибини джерел електромагнітного поля метод не забезпечує, і це основний його недолік. Останнім часом метод ПЕМПЗ, який ще в кінці минулого століття використовували для вирішення

інженерно-геологічних завдань тільки в Росії та Україні, з успіхом впроваджено і в інших країнах [Abaturova et al., 2017; Frid, 1997; Gondwe et al., 2010; Greiling & Obermeyer, 2010; Obermeyer, et al., 2001; Pueyo-Anchuela, et al., 2010; Rabinovitch, et al., 1996].

Зазначимо, що останнім часом в інженерній геології з успіхом застосовують методи електротомографії (електричного сканування) та радіохвильового просвічування, про що свідчать, наприклад, матеріали конференції [Abaturova, et al., 2017]. Проте обмеженість цих методів за глибиною не дає підстав розглядати їх як перспективні на Прикарпатських соляних родовищах.

### **Мета**

Метою роботи є перевірка ефективності та достатності комплексу методів ПЕМПЗ та ЗС для попередньої оцінки ступеня стабільності гірничого масиву в межах Стебницького родовища калійної солі, а також прогнозу розвитку деформаційних процесів та їх фізичного пояснення.

### **Методика**

Послідовність викладення подальших досліджень така: методика польових геофізичних робіт, розгляд результативних матеріалів ЗС, узгодження даних ПЕМПЗ та ЗС, геометризація аномальних зон по глибині та по площині, принципи комплексування методів ЗС та ПЕМПЗ, залучення до аналізів результатів геодезичних спостережень за деформацією земної поверхні.

Конкретний об'єкт наукових досліджень – ділянка автомобільної дороги Східниця–Пісочне та прилегла до неї територія, розташована у межах південно-західної частини гірничого відведення рудника № 2 Стебницького родовища. Вибір ділянки пояснюється такими причинами: деформацією полотна автодороги, наявністю під автодорогою видобувних камер, карстовими провалами біля автодороги та значним просіданням земної поверхні. Автодорога є основною магістраллю до міста Трускавець – курорту європейського значення.

З геологоструктурного погляду територія досліджень міститься у внутрішній зоні Передкарпатського прогину. Відклади, що утворюють геологічну будову території, належать до міоцену – нижнього відділу неогену. За структурними характеристиками розріз цієї ділянки не є складним. Приповерхневий шар утворений четвертинними делювіально-алювіальними відкладами суглинками, супісками з деяким вмістом гальки. Нижче залягають утворення гіпсоглинистої шапки (ГГШ) потужністю 80–120 м. ГГШ відносять до четвертинно-неогенового віку (породи, відкладені у неогеновий час, які зазнали значної метаморфізації внаслідок вивітрювання і вимивання солі). Наступним шаром є неогенові породи воротищенської світи, у яких виділено верхньоворотищенські соленосні відклади та

нижньоворотищенську засолену брекчію. Контакти між пластами субвертикальні.

Під час видобування солі внаслідок деформації гірських порід активізувалась циркуляція підземних вод у межах гіпсоглинистої товщі та відбувся розмив поверхні соляного дзеркала. Внаслідок інтенсивних фільтраційних процесів у покривній та соленосній товщах розвивались суфозійно-карстові явища, що призвело до розуцільнення масиву гірських порід, втрати стійкості покривних порід над гірничими виробками і відповідно раптового просідання земної поверхні та утворення провальних воронок. Крім того, відзначаються обвалення видобувних камер. Зазначено, що рудник № 1 в сухому стані, а рудник № 2 затоплюється. Загальний об'єм камер рудника № 2 – 13651400 м<sup>3</sup>. З них уже затоплено близько 11,5 млн м<sup>3</sup>. Площа камер, що затоплюється, становить 120 тис. м<sup>2</sup>. Площі гірничого відведення рудника № 1 – 976,8 га, а рудника № 2 – 1289 га.

Як зазначалось раніше, дослідження виконували фахівці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України відповідно методами ПЕМПЗ та ЗС. Спостереження методом ПЕМПЗ були площинними і виконувались на суцільній ділянці за сіткою 20×10 м загальним розміром 1360×140 м. Для цього використано апаратуру РХІНДС-М із робочим діапазоном частот 2–50 кГц. Метод ЗС використовували у модифікації “петля в петлі” установками для малоглибинних (10–60 м, генераторна петля розміром 30×30 м<sup>2</sup>, приймальна – 20×20 м<sup>2</sup>) та глибинних (50–400 м, петлі 125×125 м<sup>2</sup> та 20×20 м<sup>2</sup>×27 витків відповідно) зондувань. Зондування виконано вздовж двох основних профілів завдовжки близько 1300 м кожний, які розташовані субпаралельно до автодороги по обидві сторони від неї (рис. 1).

Зазначимо, що вздовж дороги, на схід від неї, на відстані від перших метрів до 40 метрів розташована реперна лінія, вздовж якої щорічно з 1996 до 2017 рр. виконувались геодезичні нівелірні спостереження. Це дало можливість простежити динаміку просідань земної поверхні та узгодити результати з геодезичними дослідженнями.

### **Результати**

Кінцевим результатом оброблення вихідних даних, отриманих під час вимірювань методом ЗС, є геоелектричні розрізи, на яких зображено зміну електричних опорів із глибиною. Для прикладу на рис. 2 наведено фрагмент глибинного розрізу для профілю 1, отриманого за результатами спостережень глибиною установкою ЗС (генераторна петля 125×125 м<sup>2</sup>, приймальна – 20×20 м<sup>2</sup>×27 витків). Розріз охоплює інтервал абсолютних відміток +280 ÷ -100 м, тобто товщу потужністю 380 м.

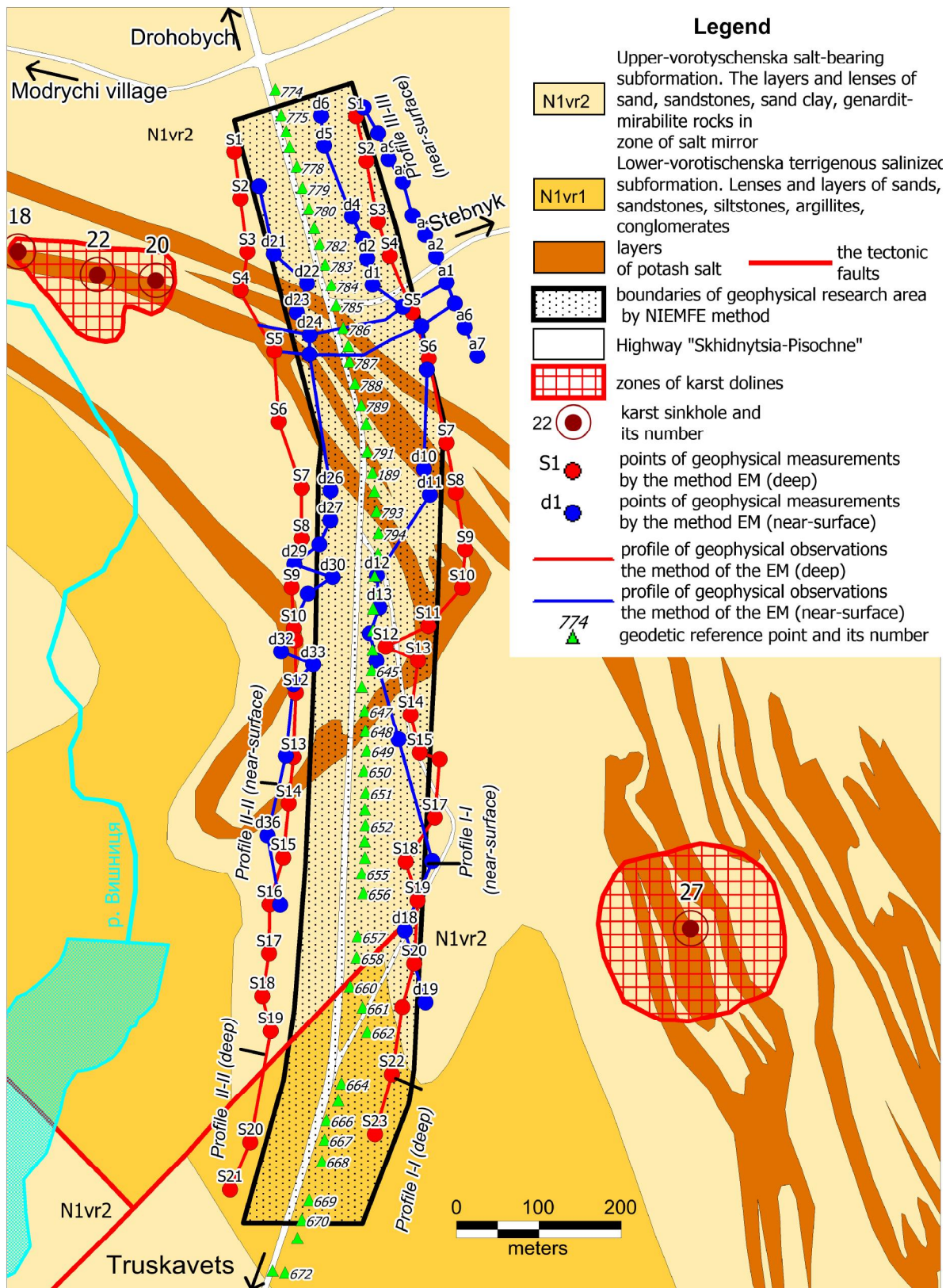
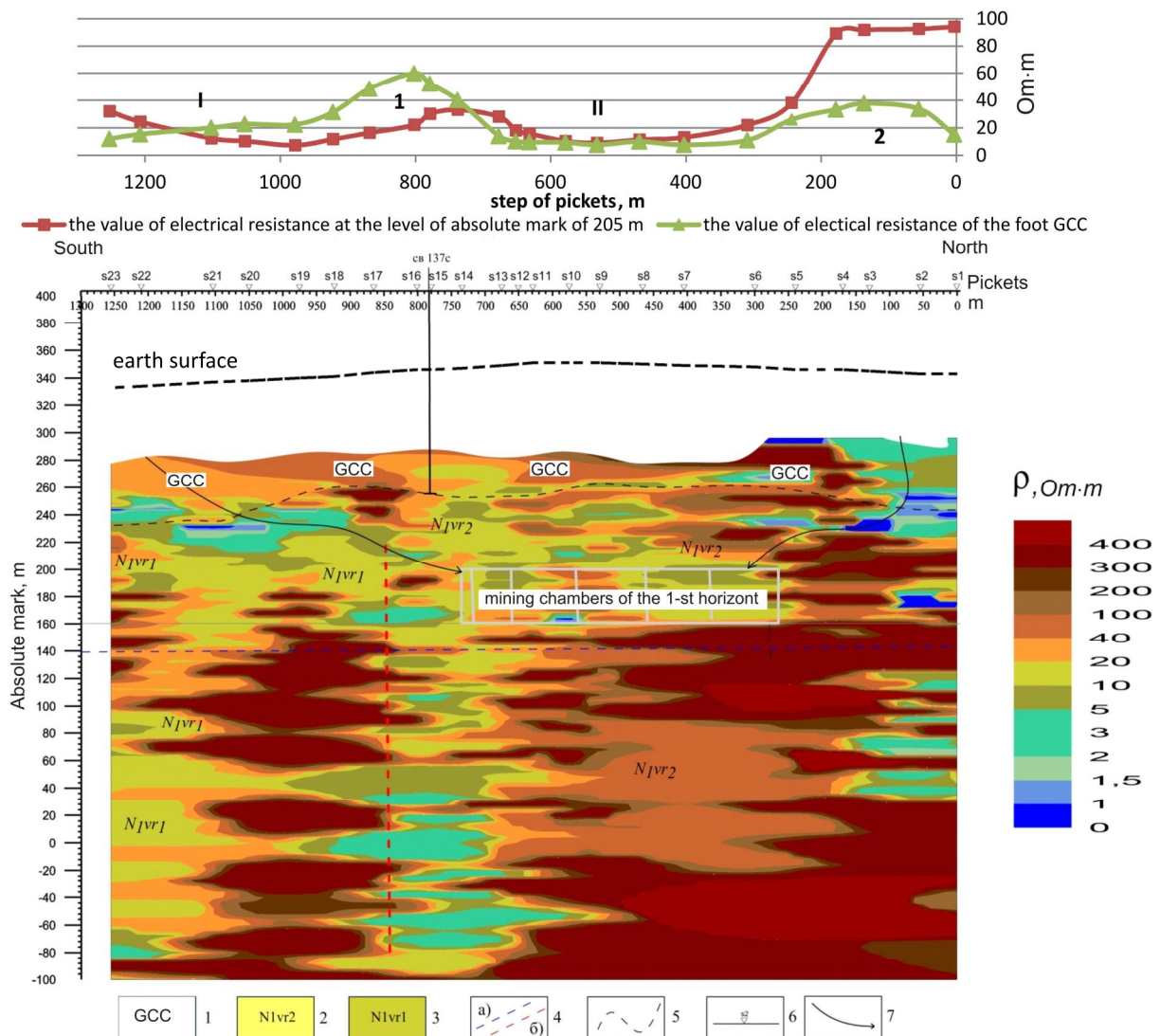


Рис. 1. Схема розташування ділянки геофізичних досліджень на Стебницькому родовищі калійної солі





**Рис. 2.** Геоелектричний розріз із графіками позірнього опору за даними ЗС вздовж профіля І-І (приповерхневі):

1 – відклади гіпсоглинистої шапки; 2 – відклади верхньоворотинської світи; 3 – відклади нижньоворотинської світи; 4а – рівень стелени камер другого горизонту; 4б – тектонічне порушення; 5 – літологічні границі; 6 – пікети зондувань ЗС; 7 – шляхи проникнення вод у камери

Цього цілком достатньо для аналізу та об'єктивних висновків. На розрізі з відмітки +150 м далі в глибину поширюється товща високоомних порід (40–400 Ом·м), розділених на блоки глибинними розломами. Зонам розломів притаманний понижений опір (2–20 Ом·м).

Розломи у південній частині профілю відповідають літологічному контакту верхньо- і нижньоворотинських порід. Другий розлом, що у верхній частині розкритий свердловиною (позначено на розрізі), далі має вертикальне падіння і раніше не був відомий. На розрізі винесено видобувні камери, підосва яких розміщена на позначці 155 м, а скошена стеліна – на позначках 201–210 м. Камери затоплені на дві третини, що відображається на розрізі зоною понижених опорів – 5–20 Ом·м, хоча окремі камери не окреслені ізолініями опорів, вра-

ховуючи інтегральні властивості методу ЗС. Імовірно, на ділянці пікетів s9, s10 (500–600 м від початку профілю) стеліна камер обвалена, що відображається у зоні камер високими опорами (понад 300 Ом·м). Крім зазначених структурних і техногенних особливостей, на розрізі спостерігаються зони активної фільтрації підземних вод. Стрілки, що показують напрямок фільтрацій на рис. 2, перетинають депресії (пониження рельєфу) уздовж границі “підосва ГГШ – покрівля неогенових воротинських порід”, що є підтвердженням достовірності розподілу на розрізі електричного опору. Центри зазначених депресій проєктуються на земну поверхню на позначках 700 м (між пікетами s13 і s14) та 1100 м (s21).

Над геоелектричним розрізом наведено два графіки електричного опору для характерних елементів розрізу. Першим елементом вибрано

підшву ГГШ. Поверхня соляного дзеркала, яка залягає нижче, імовірно, розвивається. Тому зміна опору вздовж неї дає інформацію про ступінь такого розвиву та про можливий розвиток природно-техногенного карсту. Просідання порід в утвореній карстовій порожнині призводить до розущільнення товщі, яка залягає вище, а відтак до подальшої деформації (просідання, провалів) земної поверхні. Як другий такий елемент вибрано рівень абсолютної позначки 205 м, який у середньому відповідає рівням стелин камер. Зміна опорів на цьому рівні може свідчити про розущільнення, пов'язане із фільтрацією розсолів у видобувні камери, а також про обвалення стелини. На відповідних графіках рис. 2 виділено аномалії підвищеного опору (позначено 1 і 2) та аномалії пониженого опору (I, II), які корелюють між собою. Аномалія I відповідає зоні інтенсивної інфільтрації поверхневих вод із подальшим рухом розсолів на північ – північний схід, тобто в бік камер. Аномалія II пов'язана із загальним розущільненням масиву гірських порід від рівня ГГШ до камер, яке призводить до ослаблення стійкості верхніх шарів та відображається деформаціями земної поверхні над соляним пластом.

На відміну від спостережень ЗС, які з об'єктивних причин виконані за окремими профілями і графічно відображені на окремих розрізах, знімання ПЕМПЗ є площинним. Відповідно, результати подано у вигляді карт інтенсивності електромагнітного випромінювання за напрямками X (широтний), Y (меридональний), Z (верти-

кальний) відповідно до напрямів орієнтації антен приладу. Карта повного вектора  $I = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$  відтворює вплив сигналів за кожною антеною, які звичайно корелюють між собою.

Для порівняння результатів за методами ЗС та ПЕМПЗ на рис. 3 зіставлено графіки електричних опорів підшви ГГШ, абсолютної позначки 205 м (рис. 2) та повного вектора інтенсивності ПЕМПЗ. Як показує сумісний аналіз графіків, у правій половині рисунка аномалії на графіках збігаються. Особливо виразним є цей збіг для інтенсивності та зниження опору на абсолютній позначці 205 м. Варто звернути увагу на аномалії II і 2 на профілі I-I, де зони пониженого опору корелюють із зонами пониженої інтенсивності й навпаки. Зони понижених значень інтенсивності та опору відповідають ділянкам розташування відпрацьованого першим рівнем камер соляного пласта.

На рис. 4 зображено графік інтенсивності ПЕМПЗ та зміщень земної поверхні на геодезичних реперах за даними геодезичних спостережень вздовж реперної лінії, яка розташована на площі знімання ПЕМПЗ (рис. 1). Візуальний аналіз відповідності графіків просідань аномаліям ПЕМПЗ свідчить: 1) всюди, де є просідання, є аномалії; 2) там, де є аномалія, просідання можуть бути значними, або незначними, тобто аномалії ПЕМПЗ є випереджувальним індикатором зміщень земної поверхні.

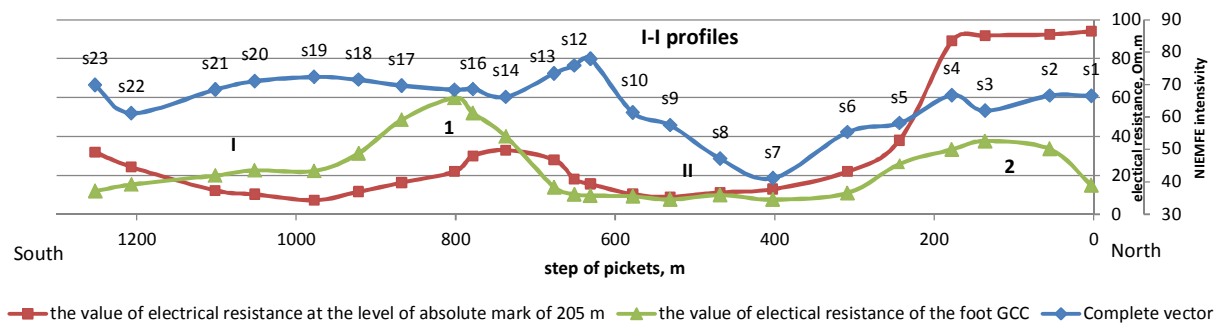


Рис. 3. Графіки зміни електричних опорів та повного вектору інтенсивності ПЕМПЗ

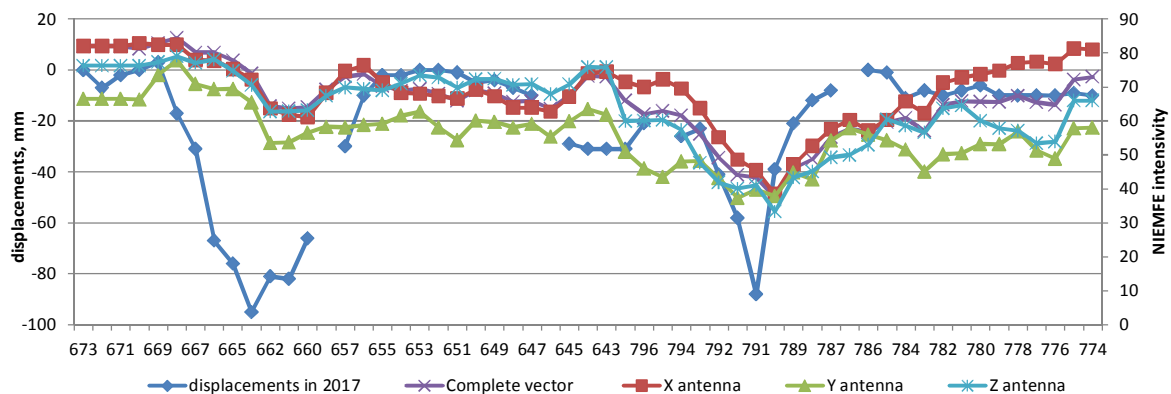


Рис. 4. Графіки інтенсивності ПЕМПЗ та зміщень земної поверхні на геодезичних реперах

Характеризуючи результати ПЕМПЗ, зазначимо, що ступінь інтенсивності електромагнітного випромінювання відповідає певній стадії деформації порід гірничого масиву та величині осідання земної поверхні. Ураховуючи багаторічний досвід геофізичних досліджень та градації стадій активності просідань, прийняті у практиці геодезичного моніторингу [Крижанівський, та ін., 2008], пропонуємо виділяти п'ять стадій деформації, характеристику яких подано у табл. 1.

Для зони розвитку пластів солі у межах ділянки досліджень спостерігається глибокий протяжний мінімум ПЕМПЗ (пікети 200–800). Цей мінімум відповідає руйнівній стадії деформацій, яка надалі розвиватиметься у північному напрямку. У південній частині профілю (пікети

1100–1200) деформація переходить у стадію загасання.

Виконаємо кореляційний аналіз між усіма задіяними геофізичними даними. Результати наведено у вигляді крос-кореляційної діаграми (рис. 5). Кореляція, як і має бути, додатна, а коефіцієнт кореляції дорівнює приблизно 0,4, це значення наближається до суттєвого (пунктирні лінії на рисунку відповідають рівню суттєвості). Отже, методи ЗС та ПЕМПЗ узгоджуються між собою навіть за абсолютно різного фізичного підходу до отримання результативних сигналів. Зауважимо, що зміщення максимального значення коефіцієнта кореляції на діаграмі (рис. 5) пояснюється простяганням пласта із північного-заходу на південний схід, що буде продемонстровано далі.

Таблиця 1

**Класифікація стадій деформації земної поверхні**

Стадія деформації	Характеристика електромагнітного поля	Стан масиву гірських порід	Стан земної поверхні за геодезичними спостереженнями
Нульова	Фонове середнє значення інтенсивності (сотні або тисячі імп./с) з можливим незначним відхиленням за рахунок літологічної неоднорідності	Відсутні будь-які передумови додаткових деформацій і зміни напружено-деформованого стану масиву гірських порід. Зазвичай відсутні шахтні виробки	Без змін упродовж значного періоду спостереження
Передпочаткова	Незначне підвищення інтенсивності поля (на сотні, рідко перші тисячі імп./с)	Незначні деформаційні процеси в масиві гірських порід, пов'язані з деякою зміною напруженого стану внаслідок вилуговування солі, можливих техногенних зрушень, ущільнення або розущільнення	Поверхневі деформації відсутні, просідань немає
Початкова	Збільшення інтенсивності поля (на сотні або перші тисячі імп./с) звичайно з мозаїчним розподілом по площі	Розвиток розущільнення порід гірничого масиву, активізація інфільтрації та фільтрації підземних вод з відображенням деформації у приповерхневому шарі	Початкове просідання земної поверхні на міліметри або перші десятки міліметрів
Активна	Значне збільшення інтенсивності поля (на тисячі імп./с). Можливе чергування на площі помірних і значних аномалій	Значне підвищення підземних карстово-суфозійних процесів із візуальним відображенням деформацій земної поверхні та споруд	Значні просідання на сотні та тисячі міліметрів, утворення карстових провалів, переважно у вигляді окремих лійок. Швидкість просідання – сотні міліметрів за рік
Руйнівна	Значне зниження інтенсивності поля (на тисячі імп./с). По краях аномалії низьких значень зазвичай утворюється кільце підвищеної інтенсивності у зв'язку і бічним напруженням	Продовження розвитку значних підземних зрушень із просіданням порід на поверхні	Значні просідання на сотні й тисячі міліметрів. Поряд із незначними карстовими провалами можливе утворення провалів катастрофічних
Загасання	Інтенсивність поля збільшується до незначного рівня (сотні та перші тисячі імп./с). Можливі як зменшення, так і збільшення сигналу порівняно з фоновим	Вирівнювання загалом напружено-деформованого стану, тобто зняття напружень, що супроводжується остаточними локальними деформаціями	Швидкість просідання зменшується до декількох міліметрів за рік і зрештою падає до нульової

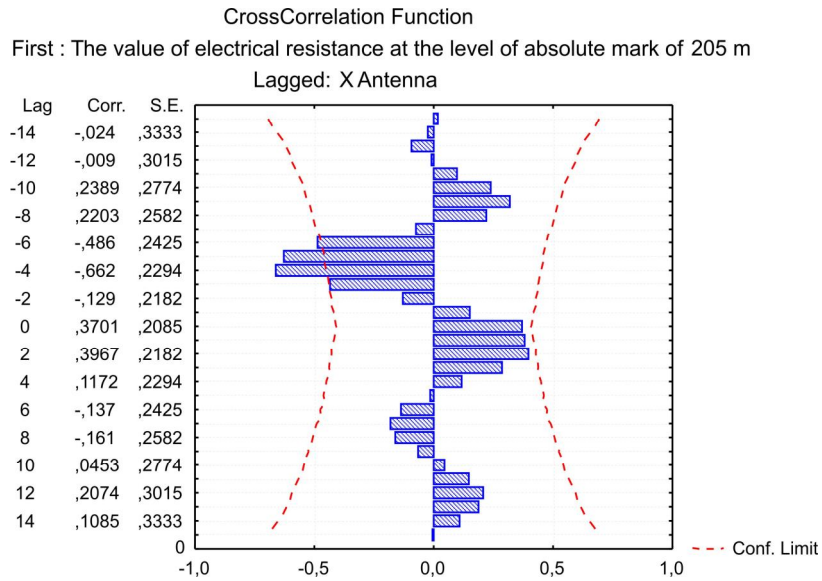


Рис. 5. Крос-кореляційна діаграма даних ЗС і ПЕМПЗ

Тепер необхідно зрозуміти, на яких саме глибинах генеруються сигнали ПЕМПЗ і чи виокремлюється певний домінуючий діапазон глибин. Щоб відповісти на поставлене питання, відібрано значення електричного опору вздовж профілю із дискретом за горизонталлю, який дорівнює відстані між точками профілю, а по вертикалі – 10 м для інтервалу абсолютних позначок 100–270 м.

Для кожної вибраної абсолютної позначки визначено ступінь кореляції значень інтенсивності ПЕМПЗ та опору за ЗС. Отриману кореляційну діаграму для антени X графічно відтворено на рис. 6.

Перед аналізом графіка рис. 6 нагадаємо, що положення підшви ГГШ коливається у межах абсолютних позначок 240–260 м, стелин камер – у межах 201–210 м, а підшва камер на рівні 155 м. Виразні зони додатних коефіцієнтів кореляції спостерігаються в інтервалах 200–210 м та 160–170 метрів. Очевидно, що перший інтервал відповідає породам, які розміщені дещо нижче від рівня підшви ГГШ і деформовані (розущільнені) внаслідок просідання у пустоти, які утворились внаслідок розмиву соляного дзеркала. Другий інтервал підвищених значень збігається із положенням камер, а саме їх затопленої частини, і спричинений, імовірно, зміною внутрішньо-камерного тиску розсолів. Надалі переходимо до площинних характеристик. На рис. 7 винесено північну ділянку площі знімання, на якій є соляний пласт із видобувними камерами та вміщувальні породи засоленої брекчії. Наведена карта містить поле інтенсивності ПЕМПЗ та смуги зміни електричних опорів (аномалії високих і низьких значень). Ширина смуги відповідає розміру петлі ЗС, тобто містить узагальнений опір, визначений для площі петлі. Крім того, на окремій умовній смузі, у центрі якої розташована реперна геодезична лінія, зазначено зони інтенсивного просідання.

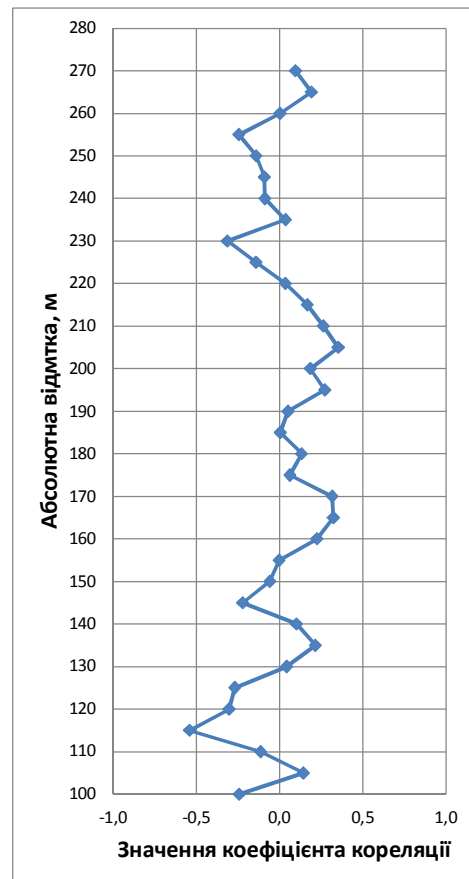


Рис. 6. Кореляція даних ПЕМПЗ та ЗС на рівні різних абсолютних позначок геоелектричного розрізу

Усі аномальні ділянки, а саме пониження інтенсивності природного електромагнітного поля, низьких значень електромагнітного опору та великих просідань, збігаються або прилягають одна до одної. Загальна аномальна зона простя-



гається з північного заходу на південний схід, а границі аномалій ЗС та ПЕМПЗ в основному збігаються. У результаті складається єдина геофізична аномалія (рис. 7).

Треба відзначити закономірність у площинних або лінійних розмірах аномалій. Найбільша за площею аномалія ПЕМПЗ. Її ширина – близько двохсот метрів у напрямку північний схід –

південний захід, а за довжиною, очевидно, вона простягається за межі ділянки знімання уздовж соляного пласта. Велика площа аномалії та істотне зниження інтенсивності поля (майже удвічі) поряд зі значним просіданням у центральній точці (185 мм, зокрема за 2017 р. – 85 мм) дають підстави стверджувати, що це ділянка руйнівних деформацій. Периферійна частина аномалій, де просідання

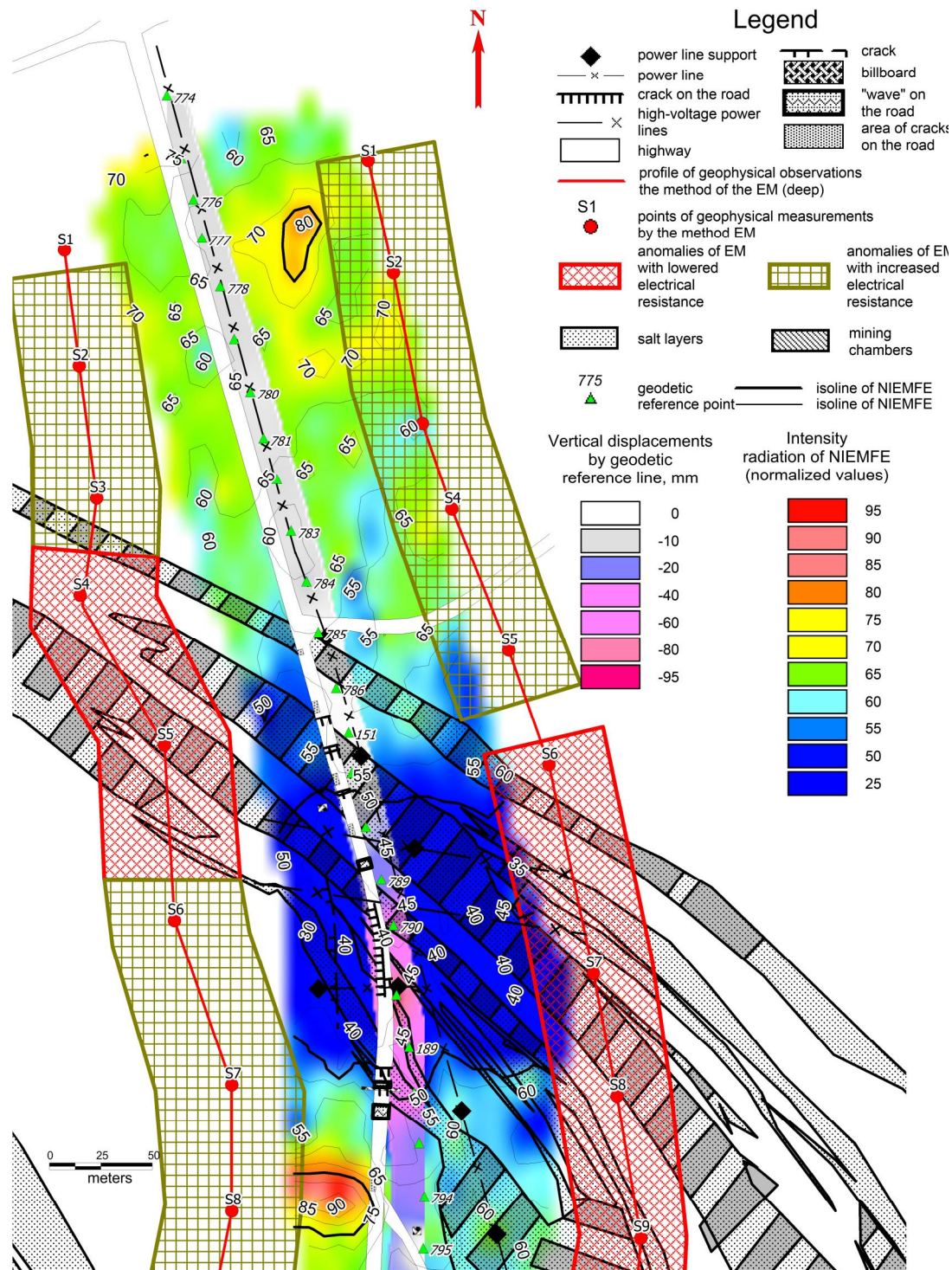


Рис. 7. Площинний розподіл аномалій за методами ЗС, ПЕМПЗ та геодезичного знімання

незначні, характеризує зону початкових деформацій, які надалі перейдуть в активну стадію. Отже, за методом ПЕМПЗ спостерігаємо аномалії, які відповідають активізації напружено-деформованого стану на різних стадіях деформацій. Контури аномалій ЗС, визначені вздовж профілів, містяться у межах аномалій ПЕМПЗ. Цей факт пояснюється тим, що для утворення аномалії пониженого опору необхідні суттєвіші розуцільнення, ніж для утворення аномалій ПЕМПЗ. Найменший розмір, порівняно з аномалією ПЕМПЗ (вздовж лінії геодезичних реперів), у ділянок просідання земної поверхні, для утворення яких необхідне значне розуцільнення гірських порід, пов'язане із розвитком карстово-суфозійних процесів та деформацією приповерхневого шару.

#### **Наукова новизна**

Полягає в експериментально підтвердженій ефективності та високій інформативності комплексного застосування методів ЗС і ПЕМПЗ для вивчення стану геологічного середовища, охопленого карстопровальними процесами у межах родовищ калійних солей.

#### **Практична значущість**

Полягає у визначенні першочергового комплексу геофізичних методів для неруйнівного контролю стану гірничих масивів на відпрацьованих соляних покладах із подальшим площинним прогнозуванням руйнівних процесів з метою запобігання наслідкам розвитку надзвичайних геологічних ситуацій. Ефективність зазначеного комплексу продемонстровано на основі досліджень в умовах розвитку природно-техногенного соляного карсту на Стебницькому родовищі калійної солі в Передкарпатті.

#### **Висновки**

Отже, доходимо висновку про доцільність комплексування площинних ПЕМПЗ та профільних ЗС. Тоді за методом ПЕМПЗ однозначно підтверджується глибинна природа просідань і провалів та прогноуються межі їх подальшого розвитку. За методом ЗС простежується розвиток процесів вилуговування солі на глибину та здійснюється диференціація гірських порід за електричним опором і відповідно ступенем розуцільнення та зонами активної фільтрації підземних вод. Метод ЗС має певні обмеження у зв'язку з методичними особливостями та вартістю, тому окремі профілі потрібно розміщувати на підставі даних площинного знімання ПЕМПЗ. Результати ЗС є інформацією для встановлення осередків зміни напружено-деформованого стану гірських порід, тобто необхідні для тлумачення причин виникнення аномалій ПЕМПЗ.

Комплексний підхід до прогнозування просідань і провалів дає змогу відтворити просторову картину динаміки змін гірничого масиву внаслідок природотехногенних факторів. Важливим є фактор наявності режимних геодезичних спостережень з погляду підтвердження небезпеки розвитку деформаційних процесів та остаточного визначення стадії деформації гірничого масиву.

#### **Список літератури**

- Багрій С. М. *Геофізичний моніторинг геологічного середовища в межах родовищ калійної солі (на прикладі Калуш-Голінського родовища)*. Дис. канд. геол. наук: 04.00.22, Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2016.
- Бурак К. О., Кузьменко Е. Д., Багрій С. М., Гринішак М. Я., Мельниченко Г. Г., Михайлишин В. П., Ковтун В. М. Особливості геодезичного моніторингу та прогнозування геотехногенної динаміки на шахтних полях калійних родовищ. *Вісник геодезії та картографії*, 2014. № 5. С. 12–18.
- Гайдін А. М., Дяків В. О., Чікова І. В. Деформації земної поверхні в зоні діяльності калійних рудників у Стебнику. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2014. № 2. С. 112–119.
- Гайдін А. М., Рудько Г. І. *Техногенний карст*. Держ. комісія України по запасах корисних копалин. Київ, Чернівці: Букрек, 2016. 196 с.
- Гайдін А. М. Врятувати Солотвино. Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування. *Матеріали П'ятої міжнародної науково-практичної конференції: у 2 т. (8–12 жовтня 2018 р., м. Трускавець)*. Державна комісія України по запасах корисних копалин (ДКЗ). К.: ДКЗ, 2018. Т. 2. С. 57–64.
- Дешиця С., Підвірний О., Романюк О., Садовий Ю., Коляденко В., Савків Л., Мишишин Ю. Оцінка стану екологічно проблемних об'єктів Калуського гірничопромислового району електромагнітними методами та їх моніторинг. *Наука та інновації*, 2016. № 12(5). С. 47–59.
- Дяків В. О., Драновська А. В., Хевпа З. З. Провал 30 вересня 2017 р. над рудником № 2 Стебницького ГХП "ПОЛІМІНЕРАЛ": причини, наслідки та сучасний стан (за результатами матеріально-балансового моделювання та моніторингових спостережень). Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування. *Матеріали П'ятої міжнародної науково-практичної конференції: у 2 т. (8–12 жовтня 2018 р., м. Трускавець)*. Державна комісія України по запасах корисних копалин (ДКЗ). К.: ДКЗ, 2018. Т. 2. С. 103–115.
- Крижанівський Є. І., Кузьменко Е. Д., Палійчук Н. В., Бараненко Б. Т. Техногенна ситуація в районі Калуського промислового вузла.

- Науковий вісник ІФНТУНГ*, 2008. № 2 (18). С. 5–11.
- Максимчук В., Сапужак О., Дешиця С., Ладанівський Б., Романюк О., Коляденко В. Дослідження карстопровальних процесів на території Стебницького родовища калійних солей методами електророзвідки. “Геофорум-2019”. *Збірник тез доповідей 24-ї Міжнародної науково-технічної конференції* (10–12.04.2019). Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2019. С. 37–38.
- Мордвінов І. С., Стасюк В. М., Пакшин М. Ю., Ляска І. І. Моніторинг вертикальних зміщень території ГХП “ПОЛІМІНЕРАЛ” з використанням супутникових інтерферометричних радарних вимірювань. Надкористування в Україні. Перспективи інвестування. *Матеріали П'ятої міжнародної науково-практичної конференції*: у 2 т. (8–12 жовтня 2018 р., м. Трускавець). Державна комісія України по запасах корисних копалин (ДКЗ). К.: ДКЗ, 2018. Т. 2. С. 94–102.
- Огильви А. А. *Основы инженерной геофизики*. учебник. М.: Недра, 1990. 501 с.
- Павлюк В. І. Природні фактори активізації екзогенних процесів на техногенно порушених ділянках поширення солених відкладів Передкарпаття. *Геодинаміка*, 2016. № 1(20). С. 94–105.
- Шуровський О. Д., Анікеєв С. Г., Шамотко В. І., Дешиця С. А., Ніколаєнко О. А., Поплюйко А. Г. Геофізичний моніторинг екобезпеки геологічних процесів в агломерації м. Калуша. *Мінеральні ресурси України*, 2012. № 2. С. 31–38.
- Шуровський О. Д., Анікеєв С. Г., Шамотко В. І., Дешиця С. А. Геофизический мониторинг геологической среды для решения экологических проблем в пределах агломерации г. Калуша. *Горный журнал*, 2013. Москва, № 12. С. 99–104.
- Abaturova, I. V., Savintsev, I. A., Borisikhina, O. A., Kozlov, V. S., Shevaldin, D. A., Balakin, V. Y. Evaluation of engineering-geological conditions of the rock mass in mining deposits of underground way, *Engineering Geophysics* 2017, DOI: 10.3997/2214-4609.201700375
- Frid, V. Electromagnetic radiation method for rock and gas outburst forecast. *Jour. Applied Geophys.*, vol. 38, 1997, pp. 97–104.
- Gondwe, B. R. N., Lerer, S., Stisen, S., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., & Bauer-Gottwein, P. (2010). Hydrogeology of the south-eastern yucatan peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing. *Journal of Hydrology*, 389 (1–2), 1–17. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.04.044.
- Greiling, R. O., & Obermeyer, H. (2010). Natural electromagnetic radiation (EMR) and its application in structural geology and neotectonics. *Journal of the Geological Society of India*, 75(1), 278–288.
- Kuzmenko, E., Bagriy, S, Chepurnyi, I., Shtohryn, M. Estimation of hazards of the surface deformations of rocks within stebnyk potassium salt deposit area by method ENPEMF. *Geodynamics*, Issue 22, 2017, pp. 98–113. DOI: 10.23939/jgd2017.01.098
- Kuzmenko, E. D., Bahrii, S. M., Dzioba, U. O. The depth range of the Earth's natural pulse electromagnetic field (or ENPEMF). *Journal Of Geology Geography And Geoecology*, Vol. 27, No 3, 2018, pp. 466–477. DOI: 10.15421/111870.
- Obermeyer, H., Lauterbach, M. and Krauter, E. Monitoring landslides with natural electromagnetic pulsed radiation. In: M. Kühne, H. H. Einstein, E. Krauter, H. Klapperich and R. Pöttler (Eds.), *International Conference on Landslides*, 2001, pp. 297–304.
- Pueyo-Anchuela, Ó., Casas-Sainz, A. M., Soriano, M. A., & Pocovi-Juan, A. (2010). A geophysical survey routine for the detection of doline areas in the surroundings of zaragoza (NE Spain). *Engineering Geology*, 114(3–4), 382–396. doi:10.1016/j.enggeo.2010.05.015.
- Rabinovitch, A., Frid, V., Bahat, D., & Shava, B. (1996). Emission of electromagnetic radiation by rock fracturing. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 24, 361–368.

E. D. KUZMENKO<sup>1</sup>, V. Yu. MAKSYMCHUK<sup>2</sup>, S. M. BAGRIY<sup>1</sup>, O. Ya. SAPUZHAK<sup>2</sup>, I. V. CHEPURNYI<sup>1</sup>, S. A. DESHCHYTSYA<sup>2</sup>, U. O. DZOBA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine, phone. (0342) 72-47-16, fax (0342) 54-67-25, e-mail: gbg@nung.edu.ua

<sup>2</sup>Carpathian branch of Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 3-b, Naukova St, Lviv, 79060, Ukraine, phone. +38(032)2648563, e-mail: carp@cb-igph.lviv.ua

#### INTEGRATION OF ELECTRIC PROSPECTING METHODS FOR FORECASTING THE SUBSIDENCE AND SINKHOLES WITHIN THE SALT DEPOSITS IN THE PRECARPATHIAN AREA

**Objective.** The aim of this work is to study the efficiency of combining such methods as: investigation of the natural pulse electromagnetic field of Earth (NIEMFE) and transient electromagnetics (TEM) for the preliminary assessment of the degree of stability of mining fields within the deposits of potassium salts in the Precarpathian area, as well as forecasting the development of deformation processes in the near-surface layer of the geological

environment. **Methodology.** Conducting areal and profile observations using NIEMFE and TEM techniques in the territory of the mining fields of potassium salts deposits and constructing the models of geoelectric sections; determination of zones with abnormal values of electrical conductivity and intensity of natural electromagnetic radiation. **Results.** According to the results of profile TEM and areal observations of NIEMFE on the mining field № 2 of the Stebnytsky deposit of potassium salts, zones of abnormal electrical conductivity and anomalies in electromagnetic radiation intensity were detected and outlined. On the basis of the complex interpretation, the areas of increased karst sinkhole danger on a certain part of the Truskavets – PISOCHNAYA highway were singled out. The conclusion is that a set of methods NIEMFE and TEM for assessing the degree of karst sinkhole processes in the areas of mining activities is highly informative and efficient. **Scientific novelty.** The scientific novelty lies in the experimentally confirmed efficiency and high informativeness of the complex application of TEM and NIEMFE methods for studying the state of the geological environment endangered by karst deformation processes within the deposits of potassium salts. **Practical significance.** The proposed set of geophysical methods of TEM and NIEMFE allows predicting with high reliability the areas of probable karst sinkhole formation, which will allow taking preventive measures to minimize the consequences of karst deformation processes of a geological nature upon human settlement.

*Key words:* Stebnytsky deposit, potassium salt, perfusion-filtration process, electrical exploration, gypsum-clay cap, karst, depression.

Надійшла 20.10.2019